

MODUL BIOKIMIA
MATERI METABOLISME LEMAK, DAUR ASAM SITRAT,
FOSFORILASI OKSIDATIF DAN JALUR PENTOSA FOSFAT



OLEH :
RINI SYAHNITA
1411060169

Dosen Pembimbing :
INDARTO, M. Sc

PENDIDIKAN BIOLOGI
FAKULTAS TARBIYAH DAN KEGURUAN
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI RADEN INTAN LAMPUNG
1442 H / 2021 M

ABSTRAK

Hubungan antara proses biologi dan kimia pada makhluk hidup saling berkaitan erat. Hal tersebut dapat dilihat, misalnya dari proses pencernaan makanan dalam tubuh yang tidak lepas dari kedua proses tersebut. Metabolisme kimiawi dalam sistem pencernaan makanan memiliki peranan penting dalam tiap prosesnya.

Reaksi-reaksi kimia yang terjadi dalam sistem pencernaan dapat membantu pemecahan molekul-molekul makanan menjadi molekul yang lebih sederhana, sehingga dapat diserap oleh tubuh. Seperti halnya lemak juga merupakan sumber energi dalam proses metabolisme yang terjadi di dalam tubuh. Besarnya energi yang dihasilkan setiap gram lemak adalah lebih besar dari energi yang dihasilkan oleh 1 gram karbohidrat atau 1 gram protein. 1 gram lemak menghasilkan 9 kal, sedangkan karbohidrat atau protein hanya menghasilkan 4 kal/gram.

Modul ini merupakan bahan ajar dengan materi khusus biokimia yang berkaitan dengan metabolisme lemak seperti, pencernaan lemak, tranpor lemak, pemecahan, sintesis lemak dan lainnya, di rancang sedemikian rupa untuk dapat di pelajari secara mandiri dan di desain untuk menguasai tujuan belajar yang spesifik. Modul ini bersifat karya tulis ilmiah karena termasuk di dalamnya artikel yang di susun secara sistematis berdasarkan observasi.

Kata Kunci : Metabolisme Lemak, Reaksi Kimia.



**KEMENTERIAN AGAMA
UIN RADEN INTAN LAMPUNG
FAKULTAS TARBIYAH DAN KEGURUAN**

Alamat: Jl. Letkol H. Endro Suratmin Sukarame Bandar Lampung Telp. (0721) 703260

PERSETUJUAN

Judul Skripsi/Modul : Pengelolaan Laboratorium
Nama Mahasiswi : Rini Syahnita
NPM : 1411060169
Jurusan : Pendidikan Biologi
Fakultas : Tarbiyah dan Keguruan

MENYETUJUI

**Untuk Dimunaqasyahkan dan Dipertahankan dalam sidang
Munaqasyah Fakultas Tarbiyah dan Keguruan
UIN Raden Intan Lampung**

Pembimbing

Indarto, M.Sc.
NIP.-

Mengetahui

Ketua Jurusan Pendidikan Biologi

Dr. Eko Kuswanto, M.Si.

NIP. 19750514 2008 01 1 009



**KEMENTERIAN AGAMA
UIN RADEN INTAN LAMPUNG
FAKULTAS TARBIYAH DAN KEGURUAN**

Alamat: Jl. Letkol H. Endro Suratmin Sukarama Bandar Lampung Telp. (0721) 703260

PENGESAHAN

**Modul dengan judul: Pengelolaan Laboratorium disusun oleh:
Rini Syahnita NPM: 1411060169 Jurusan Pendidikan Biologi
telah diujikan dalam sidang Munaqosyah Fakultas Tarbiyah dan
Keguruan Pada Hari/tanggal: 10 Juni 2021.**

TIM MUNAQOSYAH

Ketua : Dr. Eko Kuswanto, M.Sc (.....)

Sekretaris : Aulia Ulmillah, M.Sc (.....)

Pembahas Utama : Fredi Ganda Putra, M.Pd (.....)

Pembahas : Indarto, M.Sc (.....)

**Mengetahui
Dekan Fakultas Tarbiyah dan Keguruan**

Prof. Dr. Hj. Nirva Diana, M.Pd.
NIP. 19640828 198803 2 002

MOTTO

يَبْنِي أَذْهَبُوا فَتَحَسَّسُوا مِنْ يُوسُفَ وَأَخِيهِ وَلَا تَأْيَسُوا مِنْ رَوْحِ اللَّهِ
إِنَّهُ لَا يَأْيَسُ مِنْ رَوْحِ اللَّهِ إِلَّا الْقَوْمُ الْكَافِرُونَ ﴿٨٧﴾

Artinya : “Hai anak-anakku, pergilah kamu, maka carilah berita tentang Yusuf dan saudaranya dan jangan kamu berputus asa dari rahmat Allah. Sesungguhnya tiada berputus asa dari rahmat Allah, melainkan kaum yang kafir.”

(Q.S. Yusuf : 87)



PERSEMBAHAN

Dengan tidak hentinya rasa syukur Saya panjatkan kehadiran Allah SWT, atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya serta tak lupa pula shalawat serta salam senantiasa tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW yang kita harapkan syafa'atnya di yaumul akhir kelak.

Saya persembahkan tugas akhir ini sebagai bukti teruntuk orang-orang tercinta, terkasih dan tersayang khususnya kepada :

1. Yang teristimewa kepada Ibunda Asnita dan Ayahanda Syahril, beliau berdualah sumber semangat penulis dalam pengerjaan tugas akhir ini. Terima kasih yang tiada henti atas segala support, perjuangan dan do'a yang selalu terpanjatkan di tiap sujud setiap harinya.
2. Yang tercinta kepada suami Saya, Yusuf Ikhwansyah, A.Md.T. Terima kasih karena atas do'a, support, serta bersedia meluangkan waktunya untuk memberikan bantuan demi berjalan lancarnya tugas akhir ini.
3. Yang tidak kalah istimewanya kepada adik-adikku tersayang, Jufita Peron, S.Pd, Suci Ramadhanti dan Khusna Umi Latifah. Terima kasih untuk do'a, semangat dan supportnya yang hingga saat ini masih terus terurai.

RIWAYAT HIDUP

Penulis bernama Rini Syahnita, di lahirkan di Kota Bandar Lampung pada hari rabu tanggal 05 Juli 1995, anak perempuan ini adalah buah hati yang lahir dari pasangan Ibunda Asnita dan Ayahanda Syahrial. Yang merupakan anak sulung dari dua saudari lainnya yaitu Jufita Peron, S.Pd dan si bungsu bernama Suci Ramadhanti.

Masa pendidikan penulis dimulai pada sekolah tingkat Taman Kanak-Kanak di TK Al-Azhar XVI Kemiling Permai Bandar Lampung pada tahun ajaran baru, di tahun 2000 dan menyelesaikan pendidikan pada tahun 2001. Kemudian penulis melanjutkan Pendidikan Dasar di SD Negeri 3 Kemiling Permai Bandar Lampung dan menyelesaikannya pada tahun 2008. Setelah itu penulis duduk di Sekolah Menengah Pertamanya di SMP Negeri 22 Bandar Lampung pada tahun 2008 dan menyelesaikan studinya di tahun 2011. Selanjutnya penulis memasuki masa putih abu-abunya di SMA Negeri 14 Bnadar Lampung pada tahun ajaran baru 2011 dan menyelesaikannya pada tahun 2014.

Pada tahun 2014 penulis melanjutkan jenjang pendidikannya ke perguruan tinggi di terima melalui jalur masuk undangan pada Program Strata I (S1) Fakultas Tarbiyah dan Keguruan, Program Studi Pendidikan Biologi, di kampus hijau Universitas Islam Negeri Raden Intan Lampung. Selama menjadi mahasiswa penulis mendapatkan banyak pengalaman selain teori dan praktik dari ilmu di ruang belajar juga pengalaman dari luar kampus melalui mata kuliah Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Pekon Bulu Manis, Kecamatan Bulu Rejo, Kabupaten Pringsewu dan merasakan menjadi seorang tenaga pengajar, yakni guru dalam mata kuliah setelah Kuliah Kerja Nyata (KKN), yaitu Praktek Pengalaman Lapangan (PPL) di SMP Negeri 19 Bandar Lampung.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahilalamin, puji syukur atas kehadiran Allah SWT, berkat kebajikan dan petunjuk-Nya saya dapat menyelesaikan **“Modul Biokimia Metabolisme Lemak, Daur Asam Sitrat, Fosforilasi Oksidatif Dan Jalur Pentosa Fosfat”** ini dengan tepat pada waktunya, dan tak lupa pula shalawat serta salam senantiasa tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW, yang kita harapkan syafa’atnya di yaumul akhir kelak.

Selama proses pembuatan modul ini, penulis menyadari apabila tidak ada bimbingan, arahan, dan motivasi yang diberikan maka modul ini tentunya tidak akan selesai. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih sedalam-dalamnya dari lubuk hati yang paling dalam kepada semua pihak yang telah membantu dalam proses penyelesaian modul ini. Rasa hormat dan terima kasih penulis sampaikan kepada :

1. Prof. Dr. Hj. Nirva Diana, M.Pd selaku Dekan Fakultas Tarbiyah dan Keguruan Universitas Islam Negeri Raden Intan Lampung.
2. Dr. Eko Kuswanto, M.Si selaku Ketua Jurusan Program Studi Pendidikan Biologi.
3. Indarto, M.Sc selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan arahan kepada penulis hingga akhir penyusunan modul ini.
4. Ibu dan Bapak dosen Fakultas Tarbiyah Dan Keguruan yang telah mendidik dan memberikan ilmu pengetahuan selama penulis mengemban ilmu, menjadi sumber motivasi dan pencetus ide-ide sehingga terciptalah modul ini.
5. Pimpinan perpustakaan beserta staff, baik Perpustakaan Universitas, Perpustakaan Fakultas Tarbiyah dan Perpustakaan Jurusan, yang telah menyediakan sumber bacaan dan pedoman dalam penulisan modul.
6. Sahabat-sahabatku, Anastasia Puspa Andini, , Dian Hutami, S.Tr.AK, Merly Agustia Arlita, S.Tr.AK, yang senantiasa sabar mendengar selipan curahan hati penulis serta terus meberikan pemecahan masalah serta motivasi.

7. Teman-teman Program Studi Pendidikan Biologi Angkatan 2014, teman-teman seperjuangan yang sama-sama melaksanakan siding akhir munaqosyah di tanggal 10 Juni 2021, terima kasih terus mau berjuang untuk menyelesaikan studi ini dengan semangat.
8. Almamater Hijau tercinta Universitas Islam Negeri Raden Intan Lampung yang telah membentuk karakter matang penulis, sebagaimana menjadi seorang mahasiswa.

Saya berharap modul ini dapat membantu para pembaca dalam menyelesaikan masalah mengenai mata kuliah biokimia, khususnya di materi metabolisme lemak, karena secara umum modul ini membahas materi berkaitan dengan metabolisme lemak seperti, pencernaan lemak, tranpor lemak, pemecahan, sintesis lemak dan lainnya. Dapat di katakan modul ini sesuai dengan mata kuliah biokimia, khususnya di materi metabolisme lemak.

Semoga **“Modul Biokimia Metabolisme Lemak, Daur Asam Sitrat, Fosforilasi Oksidatif Dan Jalur Pentosa Fosfat”** ini dapat meberikan manfaat serta memberikan pengetahuan bagi yang membaca.

Aamiin Yaa Rabbal 'Alamin

Bandar Lampung, 10 Juni 2021

Rini Syahnita
NPM. 1411060169

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
BAB I METABOLISME LEMAK	1
A. Pencernaan dan Tranpor Lemak	1
1. Pencernaan Lemak	1
2. Tranpor Lemak	4
B. Oksidasi β (Beta) dan Sintesis Asam Lemak	4
1. Oksidasi β (Beta)	4
2. Sintesis Asam Lemak	8
C. Badan Keton dan Kolesterol	10
1. Badan Keton	10
2. Kolesterol	11
D. Gangguan Klinis	11
E. Pemecahan Asam Lemak	15
F. Sintesis Asam Lemak	16
G. Malonil Ko-A	18
H. Metabolisme Asam Lemak Tak Jenuh	19
I. Aplikasi LDL dan HDL	22
1. LDL (<i>Low Density Lipoprotein</i>)	22
2. HDL (<i>High Density Lipoprotein</i>)	23
SOAL - SOAL LATIHAN	24
BAB II DAUR ASAM SITRAT, FOSFORILASI OKSIDATIF DAN JALUR PENTOSA FOSFAT	27
A. Pandangan Umum Daur Asam Sitrat	27
B. Pembentukan Asetil Ko-A	28
C. Fosforilasi Oksidatif pada Eukariot	29
D. Rantai Pernafasan ATP dan ADP Translokase	29
E. Fosforilasi Glikogen	30
F. Fosfoglukomutase	31
SOAL - SOAL LATIHAN	33
DAFTAR PUSTAKA	34
PEMBAHASAN SOAL	36
PEMBAHASAN SOAL	40

BAB I

METABOLISME LEMAK

A. Pencernaan dan Tranpor Lemak

1. Pencernaan Lemak

Metabolisme merupakan proses-proses kimia yang terjadi di dalam tubuh makhluk hidup atau sel, metabolisme disebut juga reaksi enzimatik karena metabolisme terjadi selalu menggunakan katalisator enzim. Oleh karena itu, metabolisme lipida berarti proses pembakaran lipid atau lemak, ataupun proses penguraian atau perombakan lemak di dalam tubuh.

Hubungan antara proses biologi dan kimia pada makhluk hidup saling berkaitan erat. Hal tersebut dapat dilihat, misalnya dari proses pencernaan makanan dalam tubuh yang tidak lepas dari kedua proses tersebut. Metabolisme kimiawi dalam sistem pencernaan makanan memiliki peranan penting dalam tiap prosesnya. Reaksi-reaksi kimia yang terjadi dalam sistem pencernaan dapat membantu pemecahan molekul-molekul makanan menjadi molekul yang lebih sederhana, sehingga dapat diserap oleh tubuh.

Seperti halnya lemak juga merupakan sumber energi dalam proses metabolisme yang terjadi di dalam tubuh. Besarnya energi yang dihasilkan setiap gram lemak adalah lebih besar dari energi yang dihasilkan oleh 1 gram karbohidrat atau 1 gram protein. 1 gram lemak menghasilkan 9 kal, sedangkan karbohidrat atau protein hanya menghasilkan 4 kal/gram.

Metabolisme lipid atau lemak dalam tubuh terjadi dalam hati /hepar dilakukan oleh lipase yang terdapat pada getah usus dan getah pankreas, dengan pH optimum 7,5 – 8 lipid yang kita peroleh sebagai sumber energi utamanya adalah dari lipid netral, yaitu trigliserida (ester antara gliserol dengan 3 asam lemak). Secara ringkas, hasil dari pencernaan lipid adalah asam lemak dan gliserol, selain itu ada juga yang masih berupa monogliserid. Karena larut dalam air, gliserol

masuk sirkulasi portal (vena porta) menuju hati. Asam-asam lemak rantai pendek juga dapat melalui jalur ini. Sebagian besar asam lemak dan monogliserida karena tidak larut dalam air, maka diangkut oleh miselus (dalam bentuk besar disebut emulsi) dan dilepaskan ke dalam sel epitel usus (enterosit). Di dalam sel ini asam lemak dan monogliserida segera dibentuk menjadi trigliserida (lipid) dan berkumpul berbentuk gelembung yang disebut kilomikron. Selanjutnya kilomikron ditransportasikan melalui pembuluh limfe dan bermuara pada vena kava, sehingga bersatu dengan sirkulasi darah. Kilomikron ini kemudian ditransportasikan menuju hati dan jaringan adiposa.

Di dalam sel-sel hati dan jaringan adiposa, kilomikron segera dipecah menjadi asam-asam lemak dan gliserol. Selanjutnya asam-asam lemak dan gliserol tersebut, dibentuk kembali menjadi simpanan trigliserida. Sewaktu-waktu jika kita membutuhkan energi dari lipid, trigliserida dipecah menjadi asam lemak dan gliserol, untuk ditransportasikan menuju sel-sel untuk dioksidasi menjadi energi. Proses pemecahan lemak jaringan ini dinamakan lipolisis. Asam lemak tersebut ditransportasikan oleh albumin ke jaringan yang memerlukan dan disebut sebagai asam lemak bebas (*free fatty acid/FFA*).¹

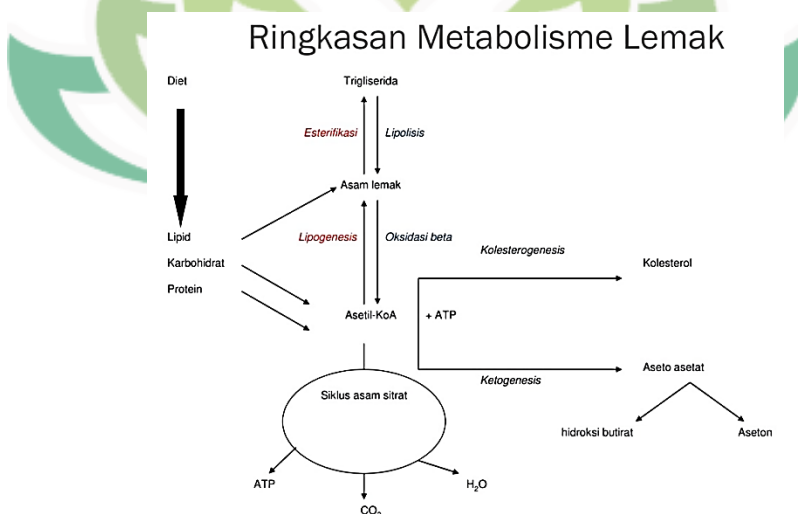
Pencernaan lemak terutama terjadi dalam usus, karena dalam mulut dan lambung tidak terdapat enzim lipase yang tidak dapat menghidrolisis lemak. Dalam usus lemak diubah dalam bentuk emulsi, sehingga dengan mudah berhubungan dengan enzim steapsin dalam cairan pankreas. Hasil akhir proses pencernaan lemak ialah asam lemak, gliserol, monogliserol, digliserida serta sisa trigliserida. Pegeluaran

¹ Hermawanbtl, "*Metabolisme Lipid*" di akses dari <https://hermawanbtl.wordpress.com> (pada 27 Mei 2021, pukul 12:33)

cairan pankreas dirangsang oleh hormon sekretin dan pankreozimin.²

Lemak yang keluar dari lambung masuk ke usus merangsang pengeluaran hormon kolesistokinin yang pada gilirannya menyebabkan kantung empedu berkontraksi hingga mengeluarkan cairan empedu ke dalam duodenum. Lipid lainnya yang dapat terhidrolisis oleh cairan pankreas antara lain adalah lesitin oleh fosfolipase, fosfatase, dan esterase. Ester kolesterol dan kolesterol esterase dihidrolisis menjadi kolesterol dan asam lemak.

Pada proses oksidasi 1 gram lemak dihasilkan energi sebesar 9 kkal, sedangkan 1 gram karbohidrat maupun protein hanya menghasilkan 4 kkal. Selain itu lemak mempunyai fungsi melindungi organ-organ tubuh tertentu dari kerusakan akibat benturan atau guncangan, sumber energi, dan sebagai pelarut vitamin A, D, E, K. Lemak juga merupakan salah satu bahan makanan yang mengandung vitamin A, D, E, dan K.³



Gambar 1.1. Proses Pencernaan Lemak

² Rafina Gaming, "Metabolisme Lipida" di akses dari <https://indoslayer.wordpress.com/2011/09/18/metabolisme-lipida/> (pada 29 Mei 2021, pukul 18:27)

³ Hermawanbtl. *Ibid*.

2. Tranpor Lemak

Pada umumnya 2,5 hingga 3 jam setelah orang makan, makanan yang mengandung banyak lemak, kadar lemak dalam darah akan kembali normal. Dalam darah lemak diangkut dalam tiga bentuk, yaitu berbentuk kilomikron, partikel lipoprotein yang sangat kecil, dan bentuk asam lemak yang terikat dalam albumin. Kilomikron yang menyebabkan darah tampak keruh, terdiri atas lemak 81-82%, Protein 2%, fosfolipid 7% dan kolesterol 9%. Kekeruhan akan hilang dan darah menjadi jernih kembali apabila darah telah mengalir melalui beberapa organ tubuh atau jaringan-jaringan, karena terjadinya proses hidrolisis lemak oleh enzim lipoprotein lipase. Lipoprotein lipase terdapat dalam sebagian besar jaringan, terdapat dalam jumlah banyak pada jaringan adiposa dan otot jantung. Sebagian besar lemak yang diabsorpsi diangkut ke hati. Disini lemak diubah menjadi fosfolipid yang kemudian diangkut ke organ-organ maupun ke jaringan-jaringan tubuh.

Asam lemak merupakan asam monokarboksilat rantai panjang. Adapun rumus umum dari asam monokarboksilat adalah: $\text{CH}^3(\text{CH}^2)_n\text{COOH}$ atau $\text{C}_n\text{H}^{2n+1}\text{COOH}^4$

B. Oksidasi β (Beta) dan Sintesis Asam Lemak

1. Oksidasi β (Beta)

Saat tubuh dalam keadaan lapar/puasa dan tidak ada asupan makanan, tubuh mampu menggunakan lemak sebagai sumber energi menggantikan karbohidrat. Lemak-lemak di dalam tubuh akan dipecah menjadi asam lemak yang selanjutnya akan didegradasi melalui oksidasi α (alfa) dan oksidasi β (beta). Oksidasi α akan memecah asam lemak menjadi molekul dengan 1 atom C, sedangkan oksidasi β memecah asam lemak menjadi molekul dengan 2 atom C.

⁴ *Ibid.*

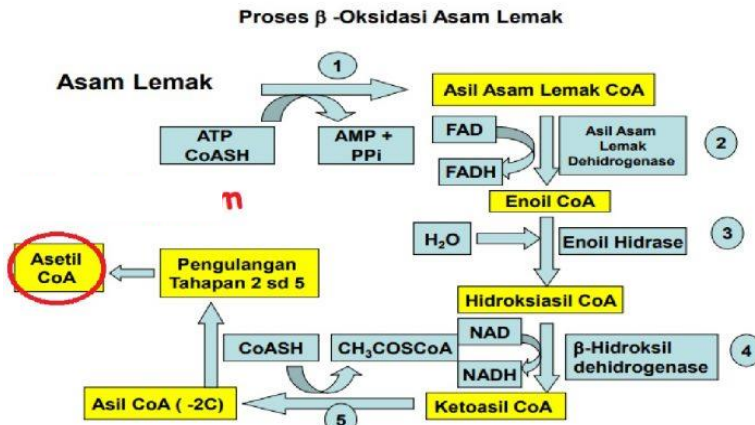
Oksidasi β merupakan jalur utama dari degradasi asam lemak. Langkah-langkah reaksi beta oksidasi adalah :

- a. Proses dehidrogenasi asil lemak-KoA dengan enzim asil-KoA dehidrogenase menghasilkan senyawa enoil-KoA. Pada reaksi ini FAD sebagai koenzim direduksi menjadi FADH₂.
- b. Ikatan rangkap pada enoil-KoA dihidrasi menjadi hidroksiasil-KoA oleh enzim enoil Ko-A hidratase.
- c. Hidroksiasil Ko-A dioksidasi menjadi ketoasil-KoA menggunakan enzim β hidroksiasil-KoA dehidrogenase. Pada reaksi ini NAD sebagai koenzim direduksi menjadi NADH.
- d. Reaksi tahap akhir dimana β hidroksiasil-KoA bereaksi dengan KoA bebas menghasilkan asetil-KoA dan sisa asam lemak, reaksi tersebut karena aktivitas enzim asetil-KoA asiltransferase.
- e. Asetil-KoA akan lepas dan meninggalkan sisa asam lemak yang akan dipotong-potong lebih lanjut menjadi asetil-KoA yang lain.

Oksidasi beta adalah proses pemecahan asam lemak menjadi asetil KoA, yang akan diproses lebih lanjut menghasilkan energi dalam bentuk ATP. Proses pemecahan/degradasi asam lemak pada eukariotik terjadi di mitokondria, jadi asam lemak yang ada di sitoplasma harus dibawa ke mitokondria dulu agar dapat berlangsung oksidasi beta.

Asam lemak yang terdapat pada sitoplasma harus diaktivasi terlebih dahulu menjadi asil lemak-KoA sebelum masuk mitokondria. Asil lemak-KoA tidak dapat begitu saja menembus membran mitokondria, molekul tersebut harus dibawa oleh pembawa (karier) yang disebut karnitin. Asil lemak-KoA akan berikatan dengan karnitin membentuk asil lemak karnitin dan menembus membrane mitokondria.

Di dalam mitokondria, asil lemak kornitin akan bereaksi dengan koenzim A sehingga terbentuk asil lemak KoA dan karnitin kembali. Karnitin kemudian akan keluar mitokondria untuk membawa asil lemak-KoA yang lainnya.



Gambar 1.2. Reaksi Beta Oksidasi

Asil lemak yang telah masuk mitokondria kemudian akan menjalani Beta Oksidasi, dengan langkah-langkah sederhana sebagai berikut :

- Asil lemak-KoA akan diubah menjadi enoil-KoA oleh enzim asil-KoA dehydrogenase
- Enoil-KoA kemudian diubah menjadi hidroksiasil-KoA oleh enzim enoil-KoA hidratase
- Hidroksiasil-KoA diubah menjadi ketoasil-KoA oleh enzim hidroksiasil-KoA dehidrogenase
- Ketoasil-KoA kemudian akan dipotong menjadi asetil-KoA dan sisa asam lemak
- Asetil-KoA akan lepas dan masuk siklus krebs untuk menghasilkan energi, sedangkan sisa asam lemak akan mengulangi reaksi dari awal agar dapat menghasilkan asetil-KoA lainnya.

Setiap asam lemak akan dipecah setiap 2 atom C sehingga apabila asam palmitat (16 atom C) akan dipecah menjadi 8 asetil-KoA (masing-masing 2 atom C). Asetil-KoA

kemudian dapat masuk ke dalam siklus krebs untuk menghasilkan ATP.

Karena tiap jenis asam lemak memiliki atom C yang bervariasi maka jumlah asetil-KoA yang dihasilkan berbeda-beda. Sebagai contoh asam palmitat dipecah menjadi 8 molekul asetil-KoA, asam oleat menjadi 9 asetil-KoA, dan asam arakidonat menjadi 10 asetil-KoA. Molekul asetil-KoA akan masuk siklus krebs untuk menjalani serangkaian proses untuk menghasilkan ATP.⁵

B-oksidasi terdiri dari pemisahan dua atom karbon asam lemak pada suatu waktu dalam bentuk asam asetat yang selalu mengoksidasi karbon ketiga (C-3 atau karbon β) mulai dari ujung karboksil (atom yang dengan nomenklatur lama diindikasikan sebagai karbon β). Untuk alasan ini seluruh proses disebut β -oksidasi.

B-oksidasi adalah proses yang terjadi dalam matriks mitokondria dan terkait erat dengan siklus krebs (untuk oksidasi asetat lebih lanjut) dan ke rantai pernapasan (untuk reoksidasi koenzim NAD dan FAD).

Tahapan B-oksidasi; Reaksi β -oksidasi pertama adalah dehidrogenasi asam lemak oleh enzim yang disebut asil KoA dehydrogenase. Enzim ini adalah enzim FAD dependen. Enzim ini memungkinkan pembentukan ikatan rangkap antara C2 dan C3: atom hydrogen hilang berkat ikatan dehydrogenase dengan FAD yang menjadi FADH₂. Reaksi kedua terdiri dari penambahan molekul air ke ikatan rangkap (hidrasi). Reaksi ketiga adalah dehidrogenasi lain yang mengubah gugus hidroksil pada C3 menjadi gugus karbonil. Akseptor hydrogen kali ini adalah NAD. Reaksi keempat melibatkan pemisahan ketoasid dengan tiolase: asetil KoA terbentuk dan asil KoA dengan rantai yang lebih pendek (2 C kurang).

Rangkaian reaksi ini diulang sebanyak C rantai / 2 minus satu, karena di bagian bawah dua asetil KoA terbentuk.

⁵ Panji Tok, "Beta Oksidasi Asam Lemak" di akses dari <https://edubio.info.com> (pada 25 Mei 2021, pukul 11:34)

Contoh: palmitoyl CoA 16: $2-1 = 7$ kali. Asetil CoA diproduksi dengan β -oksidasi dapat memasuki siklus krebs di mana ia mengikat oksalat asetat untuk oksidasi lebih lanjut hingga karbon dioksida dan air. Untuk setiap asetil CoA teroksidasi dalam siklus krebs 12 ATP diproduksi.⁶

2. Sintesis Asam Lemak

Sintesis *de novo* adalah pembentukan asam lemak (palmitat) dari asetil CoA. Asetil-CoA ini berasal dari glikolisis dan dari katabolisme asam-asam amino. Sintesis *de novo* terjadi terutama di dalam hati untuk kemudian sebagian besar diangkut dan disimpan dalam jaringan lemak dalam bentuk trigliserida.

Proses ini terjadi di sitosol, sedangkan asetil-KoA yang merupakan bahan dasarnya, terbentuk dari piruvat di dalam mitokondria. Asetil-KoA keluar dari mitokondria dengan jalan membentuk sitrat setelah bereaksi dengan oksaloasetat. Reaksi ini adalah sebagian dari siklus TCA (*tricarboxylic acid*). Sebagian dari sitrat tidak mengalami oksidasi lebih lanjut pada siklus TCA (*tricarboxylic acid*), tetapi dipindahkan keluar dari mitokondria oleh transporer-trikarboksilat yang terdapat pada membran dalam mitokondria. Reaksi ini adalah sebagian dari siklus TCA (*tricarboxylic acid*). Sebagian dari sitrat tidak mengalami oksidasi lebih lanjut pada siklus TCA (*tricarboxylic acid*), tetapi dipindahkan keluar dari mitokondria oleh transporer-trikarboksilat yang terdapat pada membran dalam mitokondria. Pada sitosol, dengan adanya ATP dan koenzim A, sitrat dipecah oleh enzim ATP-sitrat liase, membebaskan kembali asetilKoA dan oksaloasetat. Dengan demikian, asetil-KoA yang semula terbentuk dari piruvat dalam mitokondria dipindahkan ke sitosol untuk disintesis menjadi palmitat oksaloasetat yang dibebaskan pada sitosol, dengan adanya NADH, membentuk malat.

⁶ Al Air, "Biokimia Asam Lemak" di akses dari <https://id.energymedresearch.com/> (pada 25 Mei 2021, pukul 11:27)

Malat kemudian oleh enzim malat menjadi piruvat dengan melepaskan hidrogen, yang ditangkap oleh NADP. NADPH yang terbentuk digunakan sebagai donor hidrogen pada sintesis *de novo*. Piruvat yang terbentuk masuk kembali ke dalam mitokondria dan dengan dikatalisis enzim piruvat karboksilase, membentuk kembali oksaloasetat yang semula dipakai untuk membentuk sitrat. Perjalanan dari sura-oksaloasetat-malat-piruvat-oksaloasetat dan membentuk kembali sitrat ini sebagai siklus sitrat-piruvat.

Malat yang terbentuk, selain membentuk piruvat, juga dapat memasuki mitokondria dengan bantuan transporter dikarboksilat, yang kemudian masuk ke siklus TCA (*tricarboxylic acid*) membentuk kembali oksaloasetat. Selain asetil-KoA *denovo* juga memerlukan : NADH, yang diperoleh dari reaksi yang dikatalisis oleh enzim malat, dari HMP Shunt dan dari yang dikatalisis oleh enzim isositrat dehidrogenase; ATP dan CO₂ untuk sintesis malonil-KoA. CO₂ diperoleh dari bikarbonat HMP-shunt (lintasan *heksosa monophosphat*) merupakan siklus pentosa phosphat tidak menghasilkan ATP (jalur alternatif untuk oksidasi glukosa), tetapi mempunyai dua fungsi utama yaitu: (1) sebagai produksi NADPH atau digunakan sintesis reduktif seperti biosintesis asam lemak dan steroid (2) sebagai penghasil ribosa pada biosintesis nukleotida serta asam lemak.

Lintasan ini bekerja aktif di dalam hati, jaringan adiposa, korteks adrenal, tiroid, eritrosit, testis, kelenjar mammae dari wanita yang menyusui, dan memiliki aktivitas yang rendah di dalam otot skelet (otot skelet mampu mensintesis ribosa 5-phosphat untuk sintesis nukleotida).⁷

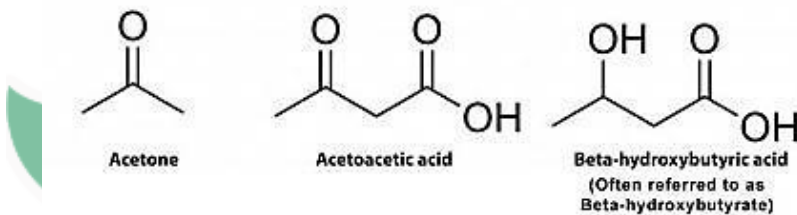
⁷ Sri Wahjuni. "Metabolisme Biokimia" Udayana University Press Denpasar, (Agustus 2013), h. 39-40

C. Badan Keton dan Kolesterol

1. Badan Keton

Ketika asetil KoA melebihi kapasitas penerimaan dari siklus krebs (defisiensi oksalat asetat) ia diubah menjadi badan keton. Konversi ke glukosa melalui *gluconeogenesis* tidak dimungkinkan. Secara khusus kelebihan asetil KoA berkondensasi menjadi dua molekul asetil KoA membentuk asetil-KoA.

Mulai dari asetil-KoA, enzim menghasilkan asetoasetat (salah satu dari tiga badan keton) yang dapat diubah menjadi 3-hidroksiburat, atau dengan dekarboksilasi, dapat diubah menjadi aseton (dua badan keton lainnya). Badan keton yang terbentuk dapat digunakan oleh tubuh dalam kondisi ekstrim sebagai sumber energi alternatif.



Gambar 1.3. Tiga badan Keton; Aseton (kiri), Asetoasetat (tengah), Beta-Hidroksibutirat (kanan).

Oksidasi asam lemak pada jumlah atom karbon ganjil, jika jumlah atom karbon asam lemak ganjil pada akhirnya diperoleh molekul propionil-KoA dengan 3 atom karbon. Propionil-KoA di hadapan biotin adalah karboksilasi dan diubah menjadi D-metilmalonil-KoA. Dengan epimerase, D metilmalonil KoA akan ditransformasikan menjadi L metilmalonil KoA. L metilmalonil KoA oleh mutase dan dengan adanya *cyanocoballamin* (vitamin B12) akan ditransformasikan menjadi suksinil KoA (perantara siklus krebs).

Suksinil KoA dapat digunakan secara langsung atau tidak langsung dalam berbagai proses metabolisme seperti *gluconeogenesis*. Oleh karena itu, dari propionil KoA, tidak seperti asetil KoA, dimungkinkan untuk mensintesis glukosa.⁸

2. Kolesterol

Obesitas merupakan keabnormalan jumlah lipid dalam darah, salah satunya adalah peningkatan kolesterol. Peningkatan kolesterol total dalam darah >240 mg/dl disebut sebagai hiperkolesterolemia. Kadar kolesterol dalam tubuh adalah satu faktor terpenting untuk menentukan risiko seseorang untuk menderita penyakit pembuluh darah jantung.

Ada beberapa faktor yang terbukti melalui penelitian dapat mempengaruhi kadar kolesterol dalam darah antara lain usia, berat badan, pola makan, aktifitas fisik, merokok, stres dan faktor keturunan. Jika seseorang memiliki terlalu banyak kolesterol dalam aliran darah, kelebihannya dapat disimpan dalam arteri, termasuk arteri koroner jantung, arteri karotis ke otak, dan arteri yang memasok darah ke kaki. Penumpukan kolesterol merupakan komponen dari plak yang menyebabkan penyempitan dan penyumbatan arteri.

Penyumbatan pada arteri kaki menyebabkan klaudikasio (nyeri saat berjalan) karena penyakit arteri perifer. Penyumbatan arteri karotis dapat menyebabkan stroke, dan penyumbatan arteri koroner menyebabkan angina (nyeri dada) dan serangan jantung.⁹

D. Gangguan Klinis

Kelainan dan gangguan klinis pada metabolisme lemak antara lain :

⁸ Al Air, *Ibid*.

⁹ Aziz Nugraha. “Hubungan Indeks Masa Tubuh Dengan Kadar Kolesterol Total Pada Guru Dan Karyawan SMA Muhammadiyah 1 Dan 2 Surakarta”. Naskah Publikasi Universitas Muhammadiyah Surakarta, (2014), h. 2-3

1). *Wolman*

Penyakit *Wolman* adalah gangguan yang dihasilkan ketika jenis spesifik pada kolesterol dan gliserida menumpuk di jaringan, gangguan ini disebabkan pembesaran limpa dan hati. Penyimpanan kalsium pada kelenjar adrenalin membuat mereka lebih keras, dan diare lemak (*steatorrhea*) juga terjadi. Bayi dengan penyakit *Wolman* biasanya meninggal dalam usia 6 bulan.

2). *Cerebrotendinous Xanthomatosis*

Terjadi ketika *cholestanol*, produk pada metabolisme kolesterol, menumpuk pada jaringan. Gangguan ini segera mengakibatkan gerakan yang tidak terkoordinasi, dementia, katarak, dan perkembangan lemak (*xanthomas*) pada tendon. Gejala-gejala kelumpuhan sering muncul setelah usia 30 tahun. Jika mulai lebih awal, obat chenodiol membantu mencegah perkembangan penyakit ini, tetapi tidak dapat membatalkan kerusakan apapun yang terjadi.

3). *Sitosterolemia*

Lemak dari buah-buahan dan sayuran menumpuk di darah dan jaringan. Pembentukan lemak menyebabkan *atherosclerosis*, sel darah merah yang tidak normal, dan penyimpanan lemak pada tendon (*xanthomas*). Pengobatan terdiri dari pengurangan asupan makanan yang kaya akan lemak tumbuhan, seperti minyak sayur, dan menggunakan resin *cholestyramine*.

4). *Gaucher's*

Glucocerebroside, yang menghasilkan metabolisme lemak, menumpuk di jaringan. Penyakit *gaucher* adalah lipidoses yang paling sering terjadi. Penyakit tersebut paling umum pada orang-orang yahudi *Ashkenazi* (eropa timur). Penyakit *gaucher* menyebabkan pembesaran hati dan limpa dan pewarnaan coklat pada kulit. Penumpukan *glucocerebroside* pada mata menyebabkan bercak kuning yang disebut *pingueculae* akan terlihat. Penumpukan pada tulang rawan

bisa menyebabkan nyeri dan menghancurkan tulang. Kebanyakan orang mengalami penyakit gaucher jenis 1, bentuk kronis, yang menghasilkan pembesaran hati dan limpa dan kelainan tulang. Kebanyakan adalah orang dewasa, tetapi anak-anak juga bisa mengalami jenis 1. Jenis 2, bentuk *infantile*, terbentuk pada masa bayi, bayi dengan penyakit ini mengalami pembesaran limpa dan kelainan sistem syaraf berat dan biasanya meninggal dalam waktu setahun. Jenis 3, bentuk *juvenile*, bisa dimulai kapan saja selama masa kanak-kanak. Anak dengan penyakit ini mengalami pembesaran hati dan limpa, kelainan tulang, dan kelainan sistem syaraf yang berkembang dengan lambat. Anak yang bertahan hidup sampai remaja bisa hidup untuk beberapa tahun. Kebanyakan orang dengan penyakit gaucher bisa diobati dengan terapi penggantian enzim, dimana enzim diberikan dengan cara infus, biasanya setiap 2 minggu. Terapi penggantian enzim lebih efektif untuk orang yang tidak mengalami komplikasi sistem syaraf.

5). *Tay-Sach*

Ganglioside, yang menghasilkan metabolisme lemak, menumpuk pada jaringan. Penyakit tersebut paling sering terjadi asli yahudi di eropa timur. Pada usia yang sangat dini, anak dengan penyakit ini menjadi semakin lambat dan tampak mengalami sifat otot yang terkulai. Terbentuk kejang diikuti kelumpuhan, dementia, dan kebutaan. Anak ini biasanya meninggal di usia 3 atau 4 tahun. Penyakit *tay-sachs* bisa diidentifikasi pada janin dengan contoh *chorionic villus* atau *amniocentesis*. Penyakit ini tidak dapat diobati atau disembuhkan.

6). *Niemann-Pick*

Kekurangan enzim khusus mengakibatkan penumpukan *sphingomyelin* (produk metabolisme lemak) atau kolesterol. Penyakit *Niemann-Pick* mempunyai beberapa bentuk, bergantung pada beratnya enzim yang berkurang dan dengan demikian penumpukan *sphingomyelin* atau kolesterol. Bentuk

yang paling berat cenderung terjadi pada orang yahudi. Bentuk yang lebih ringan terjadi pada semua kelompok etnis. Pada bentuk berat yang sering terjadi (jenis A), anak gagal untuk bertumbuh dengan baik dan mengalami masalah *multiple neurologic*. Anak ini biasanya meninggal di usia 3 tahun. Anak dengan penyakit jenis B mengalami pertumbuhan lemak di kulit, daerah berpigmen gelap, dan pembesaran hati, limpa, dan batang limpa; mereka kemungkinan lambat secara mental. Anak dengan penyakit jenis C mengalami gejala-gejala di masa kanak-kanak, dengan serangan dan kerusakan syaraf. Beberapa bentuk penyakit *Niemann-Pick* bisa didiagnosa pada janin dengan contoh *chrionic villus* atau *amniocentesis*. Setelah lahir, diagnosa bisa dibuat dengan biopsi hati (pengangkatan contoh jaringan untuk diteliti di bawah mikroskop). Tidak satupun jenis pada penyakit *Niemann-Pick* ini bisa disembuhkan, dan anak cenderung meninggal karena infeksi atau gangguan progresif pada sistem syaraf pusat.

7). *Fabry*

Glycolipid, yang merupakan hasil metabolisme lemak, menumpuk pada jaringan. Karena gen tidak sempurna untuk gangguan langka ini dibawa pada kromosom X, penyakit full-blown terjadi hanya pada pria. Penumpukan *glycolipid* menyebabkan pertumbuhan pada kulit yang tidak bersifat kanker (angiokeratomas) untuk terbentuk di sepanjang bagian bawah tubuh. Kornea menjadi berawan, mengakibatkan pandangan buruk. Rasa terbakar bisa terjadi pada lengan dan kaki, dan orang tersebut bisa mengalami peristiwa demam. Orang dengan penyakit *fabry* segera mengalami gagal ginjal dan penyakit jantung, meskipun seringkali mereka hidup ke dalam masa dewasa. Gagal ginjal bisa menyebabkan tekanan darah tinggi, yang bisa mengakibatkan stroke. Penyakit *fabry* bisa didiagnosa di dalam janin dengan contoh *chorionic villus* atau *amniocentesis*. Penyakit *fabry* tidak dapat disembuhkan atau bahkan diobati secara lngsung, tetapi peneliti menginvestigasikan sebuah pengobatan dimana

kekurangan enzim digantikan dengan transfusi. Pengobatan terdiri dari penggunaan analgesik untuk membantu menghilangkan rasa sakit dan demam, orang dengan kerusakan ginjal bisa memerlukan pencangkokan ginjal.¹⁰

E. Pemecahan Asam Lemak

Ada beberapa jenis lemak, diantaranya adalah asam lemak, gliserida dan fosfogliserida. Asam lemak adalah asam monokarboksilat yang mempunyai rantai panjang. Asam lemak mempunyai rentang ukuran sebesar C12 hingga C24. Terdapat 2 jenis asam lemak, yakni:

1. Asam Lemak Jenuh
Asam lemak jenuh atau *saturated fatty acid* tidak mempunyai ikatan rangkap pada rantainya.
2. Asam Lemak Tak Jenuh
Asam lemak tak jenuh atau *unsaturated fatty acid* mempunyai satu atau lebih ikatan rangkap pada rantainya.

Lemak gliserida terdiri atas gliserida netral atau lemak netral. Maksudnya netral ialah perbandingan antara gliserol dengan asam lemak sama. Setiap gliserol memiliki ikatan 1,2, atau 3 asam lemak yang berbeda. Monogliserida, merupakan gliserol yang berikatan dengan 1 asam lemak. Digliserida, merupakan gliserol yang berikatan dengan 2 asam lemak.

Trigliserida, merupakan gliserol yang berikatan dengan 3 asam lemak. Contoh trigliserida yang banyak kamu jumpai dalam kehidupan sehari-hari adalah minyak dan lemak. Kedua trigliserida tersebut mempunyai perbedaan, yakni:

a). Lemak

Biasanya didapatkan pada hewan. Pada suhu ruang memiliki bentuk atau wujud yang padat. Lemak (*fat*) merupakan susunan dari asam lemak jenuh.

¹⁰ Dosen Pendidikan, “*Metabolisme Lipid-Kelainan Lemak*” di akses dari <https://www.dosenpendidikan.id.co.id/> (pada 2 Juni 2021, pukul 12:09)

b). Minyak

Pada umumnya ditemukan pada tumbuhan. Pada suhu ruang memiliki wujud cair. Minyak (*oil*) merupakan susunan dari asam lemak tak jenuh.

Fosfoliserida (fosfolipid) di dalam lipid terdapat kandungan gugus fosfat. Lemak akan mengalami modifikasi pada saat terdapat fosfat yang menggantikan salah satu rantai pada asam lemak. Fosfoliserida berfungsi sebagai agen emulsi dan komponen untuk menyusun membran sel.¹¹

F. Sintesis Asam Lemak

Jalan yang tampak untuk mensintesis asam lemak berbeda sekali dari Jalan oksidasinya. Senyawa yang digunakan untuk menambah panjang rantai asam lemak adalah malonil-KoA, yang disintesis dari asetil-KoA. Pada hewan tingkat tinggi sintesis asam lemak terutama terjadi dalam hati, jaringan adiposa dan dalam kelenjar susu. Di tingkat sel pembentukan asam lemak berlangsung dalam sitosol, sebaliknya pada oksidasi asam lemak terjadi pada mitokondria.

Asam sitrat dan karbondioksida merupakan senyawa yang penting pada biosintesis asam lemak, kemungkinan besar kedua senyawa di atas bertindak sebagai katalisator. Setelah berakhirnya reaksi, CO₂ yang mula-mula terlibat di dalamnya, tidak terdapat dalam asam lemak yang dibentuk.

Enzim yang mengkatalisis biosintesis asam lemak merupakan enzim kompleks yang terdiri dari tujuh protein. Tahapan Sintesis Asam Lemak sebagai berikut :

1). Pengangkutan asetil-KoA ke dalam sitoplasma

Asetil-KoA yang terdapat dalam mitokondria berasal dari tiga sumber yaitu: 1) dekarboksilasi asam piruvat, 2) degradasi asam amino dan 3) β -oksidasi asam lemak. Senyawa beratอม

¹¹ Academia, "Metabolisme Lemak: Proses, Gangguan dan Jalurnya" di akses dari <https://academia.co.id/> (pada 2 Juni 2021, pukul 11:59)

C dua buah diatas tidak dapat keluar menembus dinding mitokondria untuk menuju ke Sitosol tempat berlangsungnya sintesis asam lemak. Asetil-KoA itu dapat keluar dari mitokondria dengan Jalan mengubah senyawa tersebut menjadi asam sitrat atau diangkut oleh karnitin. Baik asil-karnitin maupun asam sitrat dapat menembus dinding mitokondria dan kemudian terurai lagi menjadi bagian-bagian.

2). Pengubahan asetil-KoA menjadi malonil-KoA

Satuan yang memperpanjang rantai pada biosintesis asam lemak adalah malonil-KoA. Pembentukan senyawa ini dikatalisis oleh enzim asetil-KoA karboksilase yang membutuhkan biotin, CO₂ dan ATP.

3). Transfer gugus asil ke kompleks enzim

Senyawa yang bertindak sebagai pemula rantai asam lemak adalah asetil-KoA. Senyawa aktif yang beratom C sebanyak dua buah ini di kait oleh ACP yang selanjutnya di tempelkan ke enzim β -ketoasil-ACP sintas.

4). Gugus malonil terikat pada ACP

Malonil-KoA, yang dibentuk melalui reaksi karboksilasi asetil-KoA, selanjutnya di kait oleh ACP. Malonil-S-KoA + HS-ACP, malonil-S-ACP + KoA-SH dengan bantuan ACP-malonil transferase.

5). Reaksi kondensasi

Setelah kedua gugus yang akan bereaksi yaitu asetil dan malonil berada pada kompleks enzim maka terjadilah reaksi kondensasi

f). Reaksi reduksi pertama

Aseto asetil yang masih terikat erat pada kait 4'-fosfopantetein direduksi menjadi β -hidroksibutiril -S-ACP oleh enzim β -ketoasil reduktase.

6). Dehidrasi

Senyawa yang terbentuk pada reaksi reduksi di atas didehidrasi pada tahap ini. Senyawa yang terbentuk tidak

jenuh pada atom C α dan β , ikatan gandanya adalah trans dan dinamakan asil-S-ACP tak jenuh.

7). Reaksi reduksi kedua

Enzim enoil-ACP reduktase (NADPH) mereduksi krotonil-S-ACP menjadi butiril-S-ACP. Senyawa yang masih tetap terkait pada kompleks melalui kait 4' fosfopantenin kemudian dipindahkan ke enzim sintase. Oleh karena itu maka ACP menjadi bebas dan dapat mengkait malonil-KoA berikutnya. Senyawa ini kemudian direaksikan dengan butiril-S-sintase dan berlangsunglah siklus sintesis yang kedua melalui urutan dan mekanisme reaksi yang sama, terjadilah siklus-siklus biosintesis berikut, sehingga tercapai panjang asam lemak tertentu. Pada biosintesis asam palmitat maka siklus yang dilalui ada sebanyak 7 kali. Hasil sintesis yang terakhir adalah palmitoil-S-ACP yang dibebaskan dari ACP-nya melalui reaksi hidrolisis dengan bantuan enzim tioesterase. Gugus palmitoil yang terikat pada ACP bisa langsung dipindahkan pada HS-KoA menjadi palmitoil -KoA dan apabila bereaksi dengan asam fosfatidat akan membentuk fosfolipida. Pada umumnya jasad hidup mensintesis asam lemak hanya sampai C16 saja.¹²

G. Malonil Ko-A

Pengubahan asetil-KoA menjadi malonil-KoA, satuan yang memperpanjang rantai pada biosintesis asam lemak adalah malonil-KoA. Pembentukan senyawa ini dikatalisis oleh enzim asetil-KoA karboksilase yang membutuhkan biotin, CO₂ dan ATP.¹³

¹² Industrial Farm Corp, "Metabolisme Asam Lemak Jenuh Dan Asam Lemak Essensial" di akses dari <https://industrialfarmcorp.wordpress.com/metabolisme-asam-lemak-jenuh-dan-asam-lemak-essensial/> (pada 2 Juni 2021 , pukul 12:32)

¹³ Brainly, "Sintesis Asam Lemak Pada Reaksi Krebs" di akses dari <https://brainly.co.id/tugas/22053229> (pada 3 Juni 2021, pukul 13:08)

Proses sintesis *denovo* meliputi pembentukan malonil-KoA. Urutan proses dari sintesis *de novo* ialah:

1. Pembentukan malonil-KoA. Malonil-KoA adalah senyawa yang diperlukan sebagai penambah 2-atom C pada sintesis *de novo*. Malonil-KoA disintesis dari asetil-KoA, yang mengalami karboksilasi dengan katalisis asetil-KoA karboksilase. Reaksi ini memerlukan energi yang diperoleh dari ATP.
2. Sintesis palmitat dari asetil-KoA. Di sini, asetil-KoA berfungsi sebagai "primer" untuk sintesis lemak. Keseluruhan reaksinya dikatalisis oleh sejumlah enzim yang bergabung dalam kompleks sintetase asam lemak. Komplek ini berupa dimer yang terdiri 2 monomer identik. Tiap monomernya tersusun atas rangkaian peptide yang terdiri atas 7 aktivitas enzim yang di bagian ujungnya terdapat suatu protein pengikat gugus asil (*Acyl Carrier Protein* = ACP).

Palmitat itu kemudian dapat diesterifikasi kasi membentuk trigliserida atau fosfolipida atau kolesterol ester. Sebagian lagi membentuk asam lemak baru dengan pemanjangan rantai, desaturasi atau gabungan keduanya (kedua proses-proses ini palmitat harus diaktifkan terlebih dahulu, oleh enzim tiokinase, menjadi palmitil-KoA).¹⁴

H. Metabolisme Asam Lemak Tak Jenuh

Dalam tubuh, asam lemak jenuh, selain diperoleh dari makanan, juga dapat disintesis dari asam lemak jenuh. Proses dikatalisis oleh serangkaian enzim yang dikenal sebagai sistem desaturasi asam lemak, yang terdapat pada mikrosom. Ikatan rangkap yang pertama selalu terbentuk di antara atom C-9 dan atom C-10. Pada *mammalia* sistem enzim desaturasi hanya bekerja pada asam-asam lemak dengan 16 atau atom C. Asam lemak monoenoat (*monounsaturated*: asam lemak dengan 1

¹⁴ Sri Wahjuni. *Ibid.* h. 42-44

ikatan rangkap) tersebut selanjutnya dapat pula disintesis, dengan sistem enzim yang sama, menjadi asam lemak polienoat, dengan penambahan satu atau beberapa ikatan rangkap lagi.

Ikatan rangkap kedua dan seterusnya tersebut, pada hewan selain terbentuk ke arah gugus karboksil, dengan jarak 3 atom C dari ikatan rangkap yang sebelumnya (pada tumbuh-tumbuhan, penambahan ikatan rangkap dapat terjadi ke arah gugus karboksil maupun ke arah atom C- \dot{A}). Akibatnya, selalu terbentuk asam polienoat dengan pola sbb: $\text{CH}_3 \text{} - \text{C} = \text{C} - \text{C} - \text{C} = \text{C} \text{} \text{COOH}$. Ikatan rangkap yang terbentuk juga selalu dalam konfigurasi cis. Dengan kombinasi antara proses desaturasi dan pemanjangan rantai dapat terbentuk berbagai asam polienoat dengan panjang rantai yang berbeda-beda. Contoh: sistem nomenklatur (pemberian nama) asam-asam lemak. Asam-asam lemak dari suatu seri pada desaturasi dan pemanjangan rantai selalu menghasilkan asam-asam lemak dari seri yang sama. Sebaliknya, asam-asam lemak dari seri yang satu tidak dapat berubah menjadi asam-asam lemak dari seri yang lain. Karena mamalia hanya dapat mensintesis asam lemak jenuh dengan jumlah atom C > 16, dan karena ikatan-ikatan rangkap berikutnya selalu terbentuk ke arah gugus karboksil, maka mamalia tidak dapat mensintesis asam-asam lemak dari seri $\dot{A} < 7$.¹⁵

Asam lemak terbagi dua yaitu asam lemak jenuh dan tidak jenuh (esensial). Asam lemak jenuh adalah rantai karbon yang tidak mengandung ikatan rangkap, contohnya asam lemak butirrat, asam lemak kaproat, asam lemak palmitat, asam lemak stearat, asam lemak kaprilat, asam lemak kaprat, asam lemak laurat, asam lemak miristat, asam lemak stearat. Asam lemak jenuh, yaitu asam lemak yang semua ikatan atom karbon pada rantai karbonnya berupa ikatan tunggal (jenuh) seperti berikut :



Contoh: asam laurat, asam palmitat, dan asam stearat.

¹⁵ *Ibid.* h. 52-53

Karakteristik asam lemak jenuh (12-24 °C) pada suhu kamar bentuk padat sedangkan (1-2 °C) bentuk cair, lemak jenuh banyak ditemukan pada hewan. Lemak jenuh tidak memiliki ikatan ganda antara atom karbon dalam rantai asam lemak. Lemak jenuh meningkatkan LDL dalam aliran darah dan meningkatkan kadar kolesterol.

Asam lemak tidak jenuh adalah asam lemak yang mengandung atau mempunyai ikatan rangkap lebih dari satu dan mengandung asam esensial yaitu asam yang tidak dapat di sintesiskan dalam tubuh contohnya asam oleat, asam linoleat, asam linolena, asam arakidonat. Asam lemak tak jenuh, yaitu asam lemak yang mengandung ikatan rangkap pada rantai karbonnya seperti berikut :



Contoh: asam oleat, asam linoleat, dan asam linolenat.

Karakteristik asam lemak tak jenuh yang memiliki ikatan rangkap. Asam lemak tak jenuh biasanya dijumpai pada lemak nabati atau tumbuhan. Asam lemak tak jenuh ini masih dibedakan lagi menjadi dua kelompok besar yaitu:

- a). Asam tak jenuh tunggal/*Monounsaturated fatty acids* (MUFAs), dimana ikatan rangkapnya hanya satu.
- b). Asam tak jenuh ganda/*Polyunsaturated fatty acids* (PUFAs) dimana ikatan rangkapnya lebih dari satu. (kehilangan hidrogennya bias 4,6,8 atau kelipatan 2 selanjutnya).

PUFAs dibedakan lagi menjadi dua bagian besar yaitu :

- a). Asam lemak Omega-6 Cis
- b). Asam lemak Omega-3 Cis¹⁶

¹⁶ Industrial Farm Corp. *Ibid.*

I. Aplikasi LDL dan HDL

1. LDL (*Low Density Lipoprotein*)

Ada dua tipe kolesterol utama, yakni *high density lipoprotein* (HDL) dan *low density lipoprotein* (LDL). Lipoprotein sendiri tersusun atas lemak dan protein dan berfungsi sebagai transportasi untuk mengangkut kolesterol di dalam tubuh.

LDL dicap sebagai kolesterol jahat. LDL mengangkut kolesterol menuju pembuluh darah arteri—menyebabkan adanya penumpukan kolesterol di dinding pembuluh darah dan dapat menimbulkan plak (aterosklerosis). Adanya plak ini dapat menurunkan aliran darah ke otot jantung (penyakit jantung koroner), otot di kaki (penyakit jantung perifer), atau sumbatan arteri tiba-tiba di otak atau jantung, menyebabkan stroke atau serangan jantung. Karena meninjau fungsinya, kadar LDL yang lebih sedikit akan lebih baik untuk kesehatan yang baik adalah 130 mg/dL.

Perubahan gaya hidup dan asupan makanan merupakan dua cara utama dalam mencegah atau menurunkan kadar kolesterol LDL. Percobaan diet yang rendah lemak, aktivitas fisik aerobik yang teratur, menjaga berat badan ideal, dan mengecilkan lingkaran pinggang secara bertahap merupakan langkah pertama yang sangat penting untuk menurunkan LDL. Beberapa obat-obatan yang dapat menurunkan kolesterol, seperti statin. Pada beberapa kasus yang jarang, LDL tinggi merupakan kondisi genetik yang diturunkan di dalam garis keluarga.

Kondisi ini disebut hiperkolestrolemia keluarga (tingginya kolesterol dalam darah yang berjalan di keluarga) yang disebabkan oleh adanya mutasi genetik yang menurunkan kemampuan hati untuk membantu membereskan kolesterol yang berlebih. Fenomena tersebut dapat

menyebabkan serangan jantung atau stroke, di usia muda sekalipun.¹⁷

2. HDL (High Density Lipoprotein)

HDL berperan dalam pengangkutan kolesterol dari seluruh tubuh ke dalam hati. Karena itu, HDL dapat mencegah pembentukan plak di pembuluh darah, melindungi arteri, dan melindungi diri dari ancaman penyakit jantung serta pembuluh darah (seperti aterosklerosis). Akibat fungsinya, HDL sering dianggap sebagai kolesterol baik. Semakin tinggi kadar HDL dalam tubuh, semakin baik. Angka ideal HDL dalam tubuh adalah 55 mg/dL untuk wanita dan 45 mg/dL bagi pria. Semakin tinggi angka HDL, semakin rendah risiko penyakit jantung, pembuluh darah, dan stroke.

Meskipun HDL umumnya ditentukan oleh faktor genetik, ada tiga cara utama untuk meningkatkan HDL:

- a. Berhenti merokok
- b. Membiasakan diet yang baik untuk kesehatan jantung, seperti rendah lemak dan tinggi serat
- c. Aktivitas fisik aerobik juga memiliki efek yang baik untuk HDL. Jika ada kesulitan dalam berolahraga, carilah teman untuk menemani dan memberikan motivasi untuk terus bergerak dan aktif.

Saat ini, beberapa obat-obatan juga dapat meningkatkan kadar HDL. Namun, semua pengobatan perlu didiskusikan lebih lanjut dengan dokter sebelum dikonsumsi.¹⁸

¹⁷ Tips Kesehatan, “*Mengenal HDL Dan LDL*” di akses dari <https://aido.id/health-articles/mengenal-kolesterol-hdl-dan-ldl/detail> (pada 2 Juni 2021, pukul 12:47)

¹⁸ Tips Kesehatan . *Ibid.*

SOAL - SOAL LATIHAN

1. Kolesterol LDL sering disebut sebagai kolesterol jahat, karena ...
 - a. Bergabung dengan protein membentuk *High Density Lipoprotein* (HDL)
 - b. Dapat larut dalam air
 - c. Berperan dalam pengangkutan lemak ke dalam sistem metabolisme tubuh
 - d. Berperan dalam pembentukan selaput pembungkus saraf
 - e. Tidak larut dalam air sehingga dapat mengendap di pembuluh darah sebagai padatan yang mempersempit pembuluh darah
2. Asam lemak yang menyembunyi ikatan antara atom C-nya merupakan ikatan tunggal ($-C-C-$) adalah ...
 - a. Asam lemak jenuh
 - b. Asam lemak tidak jenuh
 - c. Asam lemak
 - d. Asam lemak berkelanjutan
 - e. Asam lemak tunggal
3. Asam oleat, asam linoleat, dan asam linolenat merupakan asam lemak ...
 - a. Asam lemak jenuh
 - b. Asam lemak tak jenuh
 - c. Asam lemak nabati
 - d. Asam lemak hewani
 - e. Asam lemak amino

4. Asam stearat dikatakan asam lemak jenuh karena ...
- a. Membunyai ikatan rangkap satu
 - b. Membunyai ikatan rangkap dua
 - c. Membunyai ikatan rangkap tiga
 - d. Membunyai ikatan rangkap empat
 - e. Membunyai ikatan rangkap lima
5. Kelebihan asam lemak jenuh dalam tubuh akan mengakibatkan penumpukan lemak didalam arteri. Dalam jangka panjang akan menyebabkan ...
- a. Penyakit hati
 - b. Penyakit lambung
 - c. Penyakit jantung
 - d. Penyakit kulit
 - e. Penyakit pernapasan
6. Salah satu manfaat dari lemak adalah ...
- a. Memperbaiki sel yang rusak
 - b. Meneruskan sifat keturunan terbentuknya gen dalam kromosom
 - c. Untuk mencegah atau mengobati diabetes
 - d. Sebagai sumber energi
 - e. Membantu pembekuan darah saat terluka
7. Dalam tubuh terdapat berbagai jenis lipid seperti lemak, fosfolipid dan steroid. Lipid yang berfungsi sebagai sumber energi adalah ...
- a. Lemak
 - b. Fosfolipid
 - c. Steroid
 - d. Lemak dan fosfolipid
 - e. Fosfolipid dan steroid

8. Diketahui data berikut :

Pada suhu kamar berwujud padat

Dengan NaOH/KOH membentuk sabun

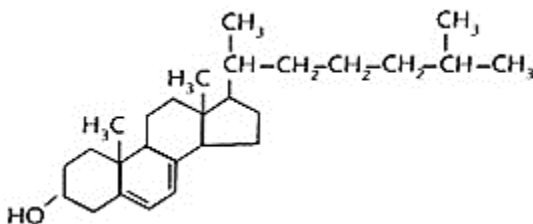
Sifat-sifat di atas dimiliki oleh ...

- a. Lemak
- b. Protein
- c. Karbohidrat
- d. Asam nukleat
- e. Minyak

9. Nama senyawa dari rumus molekul $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$ adalah ...

- a. Asam miristat
- b. Asam stearat
- c. Asam butirat
- d. Asam laurat
- e. Asam kaproat

10. Perhatikan struktur lemak berikut:



Struktur lemak di atas mempunyai karakteristik sebagai berikut, kecuali ...

- a. Komponen utama empedu
- b. Larut dalam pelarut organik
- c. Pada konsentrasi rendah akan mengkristal
- d. Terdapat dalam darah dan empedu
- e. Dapat menyebabkan penyempitan pembuluh darah

BAB II

DAUR ASAM SITRAT, FOSFORILASI OKSIDATIF DAN JALUR PENTOSA FOSFAT

A. Pandangan Umum Daur Asam Sitrat

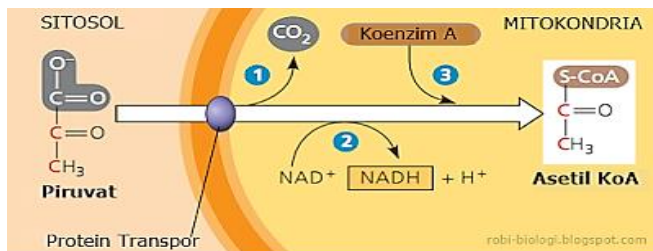
Disebut juga siklus asam trikarboksilat (*tricarboxylic acid cycle* = *TCA cycle*) atau siklus krebs. Letak terjadinya siklus asam sitrat berada di dalam mitokondria. Di dalam sel-sel jaringan hewan mamalia semua komponen siklus asam sitrat terdapat di dalam matriks mitokondria, keluar masuknya metabolit daur ini melalui membrane mitokondria merupakan proses yang aktif dan terkendali. Tahapan reaksi siklus asam sitrat :

1. Sitrat sintase $\text{Asetil KoA} + \text{oksalasetat} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{sitrat} + \text{KoA-SH}$
Merupakan reaksi kondensasi aldol yang disertai hidrolisis dan berjalan searah
2. Sitrat diubah menjadi isositrat oleh enzim akonitase yang mengandung Fe^{++} dengan mula-mula terjadi dehidrasi menjadi cis-akonitat yang tetap terikat enzim, kemudian terjadi rehidrasi menjadi isositrat reaksi ini dapat dihambat oleh fluoroasetat.
3. Isositrat oksidasi menjadi oksalosuksinat yang terikat enzim oleh isositrat dehydrogenase yang memerlukan NAD^+ reaksi ini diikuti dekarboksilasi oleh enzim yang sama menjadi α -ketoglutarat. Enzim ini memerlukan $\text{Mn}^{++}/\text{Mg}^{++}$. Ada 3 jenis isozim isositrat dehydrogenase, satu jenis isozim menggunakan NAD^+ isozim ini hanya ditemukan di dalam mitokondria NADH^+H^+ yang terbentuk akan diteruskan dalam rantai respirasi. Dua jenis isozim yang lain menggunakan NADP^+ dan ditemukan dalam mitondria dan sitosol.
4. Dekarboksilasi oksidatif α -ketoglutarat menjadi suksinil KoA oleh enzim α -ketoglutarat dehydrogenase kompleks, enzim ini memerlukan kofaktor seperti : TPP, lipoat, NAD^+ , FAD dan KoA-SH reaksi ini secara fisiologis berjalan searah dapat dihambat oleh arsenit mengakibatkan akumulasi/penumpukan α -ketoglutarat.

5. Suksinat thikonase, suksinil KoA suksinat, reaksi ini memerlukan ADP atau GDP yang dengan piakan membentuk ATP atau GTP juga memerlukan Mg^{++} reaksi ini merupakan satu-satunya dalam TCA cycle (*tricarboxylic acid acid*) yang membentuk senyawa fosfat berenergi tinggi pada tingkat substrat pada jaringan dimana gluconeogenesis terjadi (hati dan ginjal) terdapat dua jenis isozim suksinat thiokonase, satu jenis spesifik GDP, satu jenis untuk ADP. Pada jaringan nonglukoneogenik hanya ada isozim yang menggunakan ADP.
6. Suksinat dehidrogenase, suksinat + FAD Fumarat + FADH₂ reaksi ini tidak lewat NAD, dihambat oleh malonat.
7. Fumarase Fumarat + H₂O L-Malat.
8. *Malat dehydrogenase* L-Malat + NAD + Oksaloasetat + NADH + H + reaksi ini membentuk kembali oksaloasetat. Reaksi total asetil KoA + 3nad⁺⁺ FAD + adp (atau GDP) + Pi + H₂O 2CO₂ + KoA-SH + 3 NADH + 3 H⁺⁺ FADH₂ +ATP (atau GTP).¹⁹

B. Pembentukan Asetil Ko-A

Dekarboksilasi oksidatif atau pembentukan asetil Ko-A ketika memasuki mitokondria melalui transpor aktif, piruvat -hasil glikolisis- diubah menjadi senyawa asetil koenzim A atau asetil KoA. Langkah ini, persambungan antara glikolisis dengan siklus krebs, diselesaikan oleh suatu kompleks multienzim yang mengkatalis tiga reaksi: Gugus karboksil (-COO-) piruvat disingkirkan dan dilepaskan sebagai CO₂ (inilah langkah pertama yang melepaskan CO₂ slama respirasi).



Gambar 1.4. Perubahan Piruvat Menjadi Asetil-KoA (dekarboksilasi oksidatif)

Fragmen berkarbon-dua yang tersisa dioksidasi membentuk senyawa asetat (bentuk terionisasi dari asam asetat). Suatu enzim mentransfer elektron- elektron yang terekstraksi ke NAD^+ , menyimpan energi dalam bentuk NADH. Terakhir, koenzim A dilekatkan ke asetat membentuk asetil KoA.

Molekul asetil KoA kini siap memasukkan gugus asetilnya kedalam siklus krebs untuk dioksidasi lebih lanjut.²⁰

C. Fosforilasi Oksidatif pada Eukariot

Fosforilasi oksidatif adalah proses di mana energi yang diperoleh melalui degradasi molekul dari makanan, seperti glukosa, diubah menjadi ikatan dalam molekul adenosin trifosfat (ATP). Ini adalah tahap terakhir dari respirasi sel – proses memperoleh energi yang dilakukan oleh beberapa organisme dengan adanya oksigen (proses aerobik) – dan di mana produksi ATP terbesar terjadi di sebagian besar sel.

Fosforilasi oksidatif adalah salah satu jalur metabolisme respirasi sel. Pada tahap ini, yang terjadi di membran dalam mitokondria sel eukariotik dan di membran plasma sel prokariotik, terdapat produksi ATP terbesar dari molekul adenosin difosfat (ADP). Ini melibatkan dua proses, transportasi oksigen dan kemosis.²¹

D. Rantai Pernafasan ATP dan ADP Translokase

Tahap terakhir dari respirasi sel yaitu proses memperoleh energi yang dilakukan oleh beberapa organisme dengan adanya oksigen (proses aerobik) dan di mana produksi ATP terbesar terjadi di sebagian besar sel. Fosforilasi oksidatif adalah salah satu jalur metabolisme respirasi sel. Pada tahap ini, yang terjadi di membran

²⁰ Belajar Biologi, “*Dekarboksilasi Oksidatif Atau Pembentukan Asetil Ko-A*” di akses dari <https://robi-biologi.blogspot.com/> (pada 2 Juni 2021, pukul 12:54)

²¹ Naisya Pratiwi, “*Pengertian Fosforilasi Oksidatif Dan Prosesnya*” di akses dari <https://apayangdimaksud.com/> (pada 2 Juni 2021, pukul 12:57)

dalam mitokondria sel eukariotik dan di membran plasma sel prokariotik, terdapat produksi ATP terbesar dari molekul adenosin difosfat (ADP). Ini melibatkan dua proses, transportasi oksigen dan kemosis.

Pada tahap ini, molekul pembawa elektron NADH (nikotinamida adenin dinukleotida tereduksi) dan FADH₂ (nukleotida tereduksi flavin adenin) mentransfer elektronnya, dari proses degradasi glukosa pada tahap respirasi sel sebelumnya, ke rantai transpor elektron.

Rantai transpor elektron terdiri dari molekul pembawa elektron yang berbaris di membran dalam mitokondria (pada eukariota) dan membran plasma (pada prokariota). Molekul NADH mentransfer elektronnya ke molekul pertama, flavoprotein yang disebut mononukleotida flavin.

Molekul FADH₂, sebaliknya, mentransfer elektronnya ke kuinon yang disebut ubikuinon atau koenzim Q, satu-satunya senyawa non-protein dalam rantai, pada tingkat energi yang lebih rendah. Juga hadir dalam rantai adalah molekul pembawa lainnya, protein besi-belerang dan sitokrom.

Dalam rantai transpor, elektron berpindah dari molekul ke molekul, mengalir menuju tingkat energi yang lebih rendah. Dalam proses ini, proton juga dipompa dari matriks mitokondria, pada eukariota, ke ruang antar membran, membentuk gradien. Pada prokariota, gradien dibentuk melalui membran plasma.

Gradien ini menyajikan energi potensial yang tersimpan, yang digunakan dalam produksi ATP. Kemudian, elektron berikatan dengan oksigen dan ion H⁺ (proton), membentuk air.²²

E. Fosforilasi Glikogen

Ketika tubuh memerlukan glukosa untuk memperoleh energi oleh karena glukosa dalam darah tidak mencukupi, maka hati akan memecah glikogen yang ada dalam sel hati untuk mendapatkan glukosa sebagai sumber energi. Proses pemecahan glikogen dalam sel

²² Naisya Pratiwi. *Ibid.*

hati (hepatosit) diawali dengan pemecahan glikogen menjadi glukosa-1-fosfat dan glikogen, dimana reaksi ini disebut fosforilasi, karena reaksi tersebut di katalis oleh enzim fosforilase dan juga terjadi penambahan gugus fosfat. Fosforilasi menyebabkan ikatan 1,4 alfa terputus.

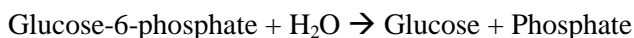
Setelah terjadi proses fosforilasi dari glikogen yang menghasilkan glukosa-1- fosfat dan glikogen, proses selanjutnya adalah memecah ikatan 1,6 alfa melalui proses hidrolisis dengan bantuan enzim alfa 1,6 glukosidase dan H₂O.

Karena fosforilasi tidak dapat memecah ikatan 1,6 alfa. Setelah ikatan 1,6 alfa terputus, maka akan ada ikatan 1,4 alfa lain yang bebas yang siap mengalami fosforilasi membentuk glukosa 1-fosfat. Dimana kita ketahui sebelumnya bahwa antara 2 ikatan 1,4 alfa akan disisipi ikatan 1,6 alfa, sehingga jika ikatan 1,6 alfa tidak dipecah terlebih dahulu, menyebabkan ikatan 1,4 alfa yang terletak di belakang ikatan 1,6 alfa tidak akan dapat mengalami fosforilasi membentuk glukosa 1-fosfat.²³

F. Fosfoglukomutase

Tahap selanjutnya dalam proses degradasi glikogen adalah merubah glukosa-1-fosfat menjadi glukosa-6-fosfat, dengan bantuan enzim “*phosphoglucomutase*”, dimana enzim ini akan memberikan gugus fosfat ke ikatan karbon no 6 sehingga terbentuk glukosa 1,6 bifosfat, selanjutnya enzim ini akan mengambil gugus fosfat yang ada di karbon no 1, sehingga terbentuklah glukosa-6-fosfat.

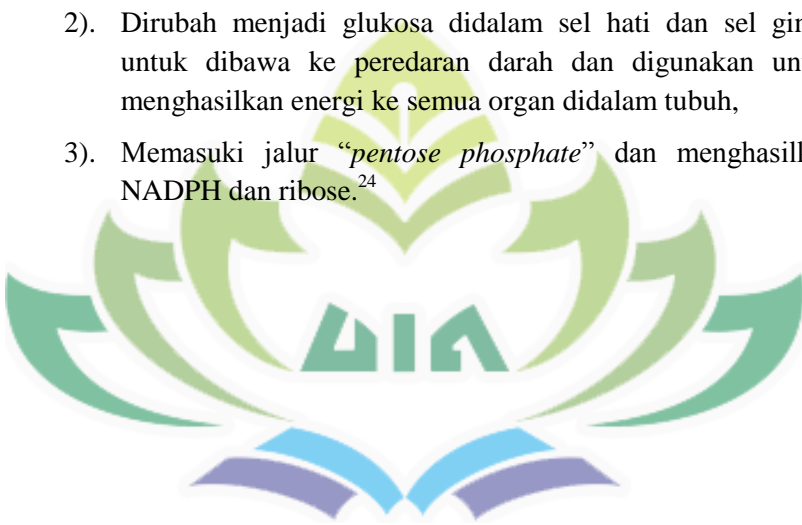
Glukosa-6-fosfat ini tidak dapat keluar dari sel hepatosit menuju peredaran darah karena masih mengikat gugus fosfat, sehingga untuk melepaskan gugus fosfatnya diperlukan suatu enzim yang bernama glukosa-6-fosfatase, yang berada di retikulum endoplasmik.



²³ Catur Suci Sutrisnani. “*Glicogen Storage Disease Tipe 1 Von Gierke Disease*”. Tugass Makalah Karbohidrat Universitas Brawijaya Malang, (2012), h. 5-6

Glukosa yang terbentuk sudah dapat menembus membran sel hepatosit menuju beredar darah dan siap digunakan untuk menghasilkan energi. Selain hati, organ yang mempunyai enzim glukosa-6-fosfatase adalah ginjal. Otot skeletan dan otak tidak mempunyai enzim tersebut sehingga organ tersebut hanya menggunakan glukosa yang mereka ambil dari peredaran darah, tanpa bisa mensintesa sendiri. Glukosa-6-fosfat yang dihasilkan dari degradasi glikogen akan mengalami 3 proses berbeda, yaitu:

- 1). Memasuki proses glikolisis, untuk dimetabolisme baik melalui proses aerobik maupun anaerobik, didalam sel otot dan sel otak.
- 2). Dirubah menjadi glukosa didalam sel hati dan sel ginjal untuk dibawa ke peredaran darah dan digunakan untuk menghasilkan energi ke semua organ didalam tubuh,
- 3). Memasuki jalur “*pentose phosphate*” dan menghasilkan NADPH dan ribose.²⁴



²⁴ *Ibid.* h. 6-8

SOAL - SOAL LATIHAN

1. Mengapa menggunakan NAD^+ dan bukan NADP^+ ? Mengapa jalur reduksi ?
2. Faktor-faktor yang menyebabkan jumlah ATP berlebih pada pembentukan asetil KoA?
3. Fungsi pengaturan dekarboksilasi ?
4. Jelaskan efek dari kelebihan oksaloasetat dalam tubuh?
5. Faktor-faktor yang menyebabkan jumlah ATP berlebih pada pembentukan asetil KoA?



DAFTAR PUSTAKA

Academia. *Metabolisme Lemak: Proses, Gangguan dan Jalurnya*. Di akses dari <https://academia.co.id/>. 02/06/2021

Al Air. *Biokimia Asam Lemak*. Di akses dari <https://id.energymedresearch.com/> 25/05/2021

Aziz Nugraha. *Hubungan Indeks Masa Tubuh Dengan Kadar Kolesterol Total Pada Guru Dan Karyawan SMA Muhammadiyah 1 Dan 2 Surakarta*. Naskah Publikasi Universitas Muhammadiyah Surakarta. 2014

Belajar Biologi. *Dekarboksilasi Oksidatif Atau Pembentukan Asetil Ko-A*. Di akses dari <https://robi-biologi.blogspot.com/> 02/06/2021

Brainly. *Sintesis Asam Lemak Pada Reaksi Krebs*. Di akses dari <https://brainly.co.id/tugas/22053229> 03/06/2021

Dosen Pendidikan. *Metabolisme Lipid-Kelainan Lemak*. Di akses dari <https://www.dosenpendidikan.id.co.id/> 02/06/2021

Catur Suci Sutrisnani. *Glicogen Storage Disease Tipe 1 Von Gierke Disease*. Tugas Makalah Karbohidrat Universitas Brawijaya Malang. 2012

Sri Wahjuni. *Metabolisme Biokimia*. Udayana University Press Denpasar. 2013

Hermawanbtl. *Metabolisme Lipid*. Di akses dari <https://hermawanbtl.wordpress.com> 27/05/2021

Industrial Farm Corp. *Metabolisme Asam Lemak Jenuh Dan Asam Lemak Essensial*. Di akses dari <https://industrialfarmcorp.wordpress.com/metabolisme-asam-lemak-jenuh-dan-asam-lemak-essensial/> 02/06/2021

Naisya Pratiwi. *Pengertian Fosforilasi Oksidatif Dan Prosesnya*. Di akses dari <https://apayangdimaksud.com/> 02/06/2021

Panji Tok.*Beta Oksidasi Asam Lemak*. Di akses dari <https://edubio.info.com> 25/06/2021

Rafina Gaming. *Metabolisme Lipida*. Di akses dari <https://indoslayer.wordpress.com/2011/09/18/metabolisme-lipida/> 29/05/2021

Slide Share. *Siklus Asam Sitrat*. Di akses dari <https://www.slideshare.net/imopriyanto/siklus-asam-sitrat/> 03/06/2021

Tips Kesehatan. *Mengenal HDL Dan LDL*. Di akses dari <https://aido.id/health-articles/mengenal-kolesterol-hdl-dan-ldl/detail> 02/06/2021

